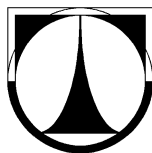


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**Fakulta strojní**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**FAKULTA STROJNÍ**  
*Katedra energetických zařízení*



**Luboš Hromádka**

Přemostění na malých vodních tocích v záplavových oblastech  
(The possibilities of bridging the small water streams in the floodplains)

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. Markéta Petříková

Počet stran: 46

Počet obrázků: 42

Počet tabulek: 5

Počet grafů: 1

Počet příloh: 3

Liberec 2011

Příloha III.

## **Prohlášení**

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date

Signature

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
FAKULTA STROJNÍ  
Katedra energetických zařízení

**Bakalářské studium**

Obor: B2341 Strojírenství

Zaměření: Energetické stroje a zařízení

**Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval Ing Markétě Petříkové za její odborné vedení, poskytnutí cenných rad a za podnětné přínosy při vypracování mé závěrečné práce a také za čas, který mi při konzultacích věnovala. Dále bych rád poděkoval p. Jaroslavu Knežovi za vytvoření experimentálních modelů.

## **Anotace**

Tato bakalářská práce je zaměřena na možnosti přemostění na malých vodních tocích v záplavových oblastech. V teoretické části jsou popsány jednotlivé konstrukce mostů, včetně jejich pilířů. Je zde základní přehled průřezů koryt, u kterých je graficky znázorněna závislost rychlosti na průtoku. Byla vybrána lokalita, na kterou se práce soustředila, a bylo nasimulováno proudění v této lokalitě. V práci je teoreticky popsána hydrodynamická podobnost pro ověření modelů pilířů v hydrodynamické vaně. Byla provedena simulace proudění v hydrodynamické vaně ve vybrané lokalitě. Závěrem byly porovnány jednotlivé úplavy za různými průřezy mostních pilířů.

## **Klíčová slova**

hydrodynamická analogie, simulace proudění, FloXpress, hydrodynamická vana, mostní pilíře, proudění

## **Annotation**

This thesis deals with the possibilities of bridging the small water streams in the floodplains. The theoretical part of the thesis describes different bridge constructions including the piers. There is a basic overview of the profile runway where is graphically illustrated the relation between the speed and the flow. The flow was simulated in chosen locality. The hydrodynamical similarity for the examination of the models piers is described in the hydrodynamic reservoir. In the chosen locality, a simulation of flow in the hydrodynamical reservoir. Was clone The thesis are closed with the comparison of different backwash behind variant profile bridge piers.

## **Keywords:**

Hydrodynamic analogy, simulation of flow, FloXpress, hydrodynamic reservoir, bridge piers, flow

<b>1 Úvod .....</b>	<b>10</b>
<b>2 Mosty .....</b>	<b>11</b>
2.1 Typy mostních konstrukcí .....	11
2.2 Průřezy pilířů .....	13
<b>3 Koryta .....</b>	<b>18</b>
3.1 Tvary koryt .....	19
3.2 Srovnání jednotlivých průřezů koryt .....	20
<b>4 Vytipování vhodné lokality .....</b>	<b>21</b>
4.1 Most pro ověření v hydrodynamické vaně .....	21
4.2 Řeka Polečnice .....	22
4.3 Současné nevyhovující řešení .....	22
4.4 Možnosti realizace optimalizace přemostění na Polečnici .....	23
4.4.1 Přemístění mostu .....	23
4.4.2 Otočení mostu o 90° .....	23
4.4.3 Prodloužení mostu o další oblouk .....	23
<b>5 Modelování v programu SolidWorks .....</b>	<b>24</b>
<b>6 Simulace proudění ve FloXpress .....</b>	<b>25</b>
6.1 Popis vizualizace .....	25
6.2 Výstupy z FloXpress .....	26
<b>7 Hydrodynamická podobnost pro stanovení modelu .....</b>	<b>29</b>
7.1 Přepočítání průtoku ze skutečného koryta na model .....	31
<b>8 Experiment v hydrodynamické vaně .....</b>	<b>32</b>
8.1 Popis hydrodynamické vany .....	32
8.2 Způsoby vizualizace proudění .....	33
8.3 Popis vizualizace .....	33
8.4 Postup experimentu .....	34
8.5 Vizualizace měření v hydrodynamické vaně .....	34
<b>9 Výsledky experimentální části .....</b>	<b>41</b>
9.1 Porovnání zřetelných odlišností u jednotlivých průřezů pilířů .....	41
9.2 Celkové hodnocení typů průřezů pilířů .....	42
9.3 Aplikace na vybranou lokalitu .....	42
9.4 Porovnání studie z FloXpress a výsledků z hydrodynamické vany .....	43
<b>10 Závěr .....</b>	<b>44</b>
<b>11 Použitá literatura .....</b>	<b>46</b>

## Seznam použitého značení

C	-	rychlostní součinitel
w	$[m \cdot s^{-1}]$	střední rychlost proudění
D	$[m]$	ekvivalentní hydraulický průměr
S	$[m^2]$	průtočný průřez
i	-	podélný sklon koryta
o	$[m]$	omočený obvod
n	-	součinitel drsnosti
Re	-	Reynoldsovo číslo
s	$[m]$	šířka pilíře
l	$[m]$	délka pilíře
S	$[m]$	šířka mostu
L	$[m]$	délka mostu
v	$[m^2 s^{-1}]$	kinematická viskozita
h	m	výška hladiny
Q	$[m^3 s^{-1}]$	objemový tok



# 1 Úvod

Mosty v záplavových oblastech musí splňovat několik kritérií. Především je nutné navrhnout dostatečně pevnou a dobře ukotvenou konstrukci mostu a mostovku umístit dostatečně vysoko nad hladinu. Pevná konstrukce mostu udrží nápor vody při případném zvednutí hladiny. Vysoko položená mostovka nepovede k zachycování naplavenin, které by vedly k ucpání vodního koryta a k rozlití vody do okolní krajiny. Nebezpečí zacpání koryta se zvyšuje, pokud mostovku podpírá pilíř. Za pilíři se vytvářejí víry, které mohou v případě nestabilního písčitého říčního dna pilíře podemlít.

Nově projektované mosty jsou stavěny s ohledem na přívalové deště a bleskové povodně. Díky rozvoji techniky a znalostí se v dnešní době na malých vodních tocích s mosty podepřenými pilíři již nesetkáme.

Mosty podepřené pilíři nám zůstaly jako dědictví z dob minulých. Vzhledem k povodním, které se v dnešní době vyskytují stále častěji, nejsou tato přemostění vždy optimální.

První zápisy o povodních pocházejí již z raného středověku, kdy v horských oblastech nastalo masivní kácení lesů. Původní, na dřeviny rozmanité lesy, dokázaly zadržet vodu daleko lépe, než dnešní lesy, které obsahují převážně jen jeden druh dřeviny. Schopnost půdy zadržovat vodu se snížila také díky rozvoji zemědělství. Často byla vysušována mokrá území pro budoucí pole. Voda je rychleji odváděna do nižších poloh, kde koryta nejsou schopna najednou pojmout takový objem. Další příčinou povodní může být i oteplování atmosféry. Teplejší atmosféra umožňuje přijmout více vodních par, ty pak v relativně krátkém čase spadnou často na jedno místo. Při zvýšené hladině není v ohrožení pouze okolí řeky, ale hlavně stavby umístěné přímo v toku, mosty a jejich pilíře.

Cílem závěrečné práce je ve vytipované lokalitě zdokumentovat závislost tvaru průřezů pilířů na vznik vírů za jednotlivými typy pilířů - řešení dané problematiky v laboratorních podmínkách konkrétně v hydrodynamické vaně a porovnání se simulací v programu FloXpress. Dalším bodem bude zjistit, co ovlivňuje průtok vody korytem. Posledním bodem bude vyhodnocení získaných výsledků včetně jejich aplikace.

## 2 Mosty

Už v dávné historii se lidé potřebovali dostávat z jednoho břehu řeky na druhý například při hledání potravy. Předchůdci mostů bývaly brody – mělká místa v potocích a řekách, která bylo možné překonat pěšky. O tom, že jich na našem území bylo mnoho, svědčí názvy řady českých měst, např. Havlíčkův Brod, Vyšší Brod, Český brod a mnoho dalších. Brody byly důležité pro vznik prvních stezek, lidé si je chránili, hlídali a často u nich vznikaly osady. Ale řeky bylo třeba překonávat v místech brodů celoročně, i při vyšší hladině.

První přemostění, kdy bylo vodní tok možné přejít suchou nohou, vznikala díky přírodě, když přes vodu popadaly kmeny stromů. To ale neřešilo problém dopravy u vznikajících stezek a cest.

Lidé začali používat při překonání řeky balvany, které umísťovali do mělkých řečišť a brodů. Časem na balvany pokládali ploché kameny nebo větve a kmeny stromů. Tím se balvany staly primitivními pilíři. Tato přemostění postačovala pouze pro pěší.

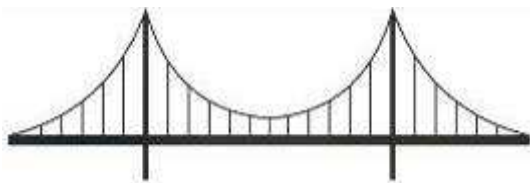
S rozvojem dopravy bylo třeba vybudovat důmyslnější stavby na překonání vody – mosty.

### 2.1 Typy mostních konstrukcí

Z konstrukčního hlediska rozdělujeme mosty na 4 základní typy: visutý, zavěšený, obloukový a nosíkový. Typ konstrukce mostu se volí podle dané lokality.

#### Visutý most

Jedná se o most s dlouhými mostními poli. Po obou stranách visí silná lana, ze kterých jsou spuštěny závěsy, které drží mostovku. Díky své pružnosti je nevhodný pro vlaky, protože se mostovka prohýbá a vlaky „jedou pořád do kopce“. Umožňují překonat největší rozpětí.



Obr. 2.1 – Visutý most – [vlastní tvorba].

### Zavěšený most

Most s pylony, ze kterých vedou lana přímo na mostovku. Lana mohou vést z jednoho bodu nebo po celé délce pylonu. Oproti visutému mostu není tak pružný, hodí se tedy jak pro automobilovou tak i železniční dopravu.



Obr. 2.2 – Zavěšený most – [vlastní tvorba].

### Obloukový most

Jedná se o nejstarší typ mostu. Nehodí se díky své konstrukci pro lodní dopravu - na krajích se světlost mostu snižuje a tím vzniká riziko, že by mohla do oblouku narazit loď.



Obr. 2.3 – Obloukový most – [vlastní tvorba].

### Nosníkový most

Nejrozšířenější typ mostu. Má vodorovnou konstrukci, která spočívá na dvou koncových podporách. Maximální délka mostovky bez pilířů – 32m. Pro překonání větších vzdáleností se mosty staví s pilíři.

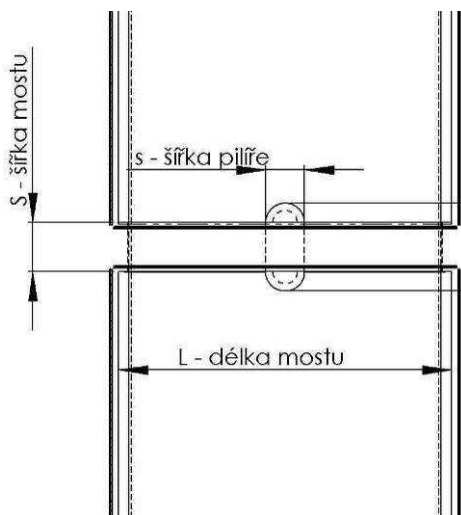


Obr. 2.4 – Nosníkový most – [vlastní tvorba].

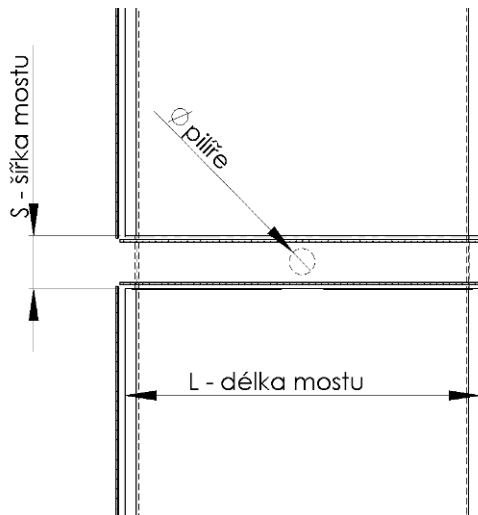
V povodňových oblastech našich krajín nejčastěji nalezneme nosníkové mosty, protože se jedná o nejběžnější typ mostní konstrukce a není zde potřeba překonávat velké vzdálenosti.

## 2.2 Průřezy pilířů

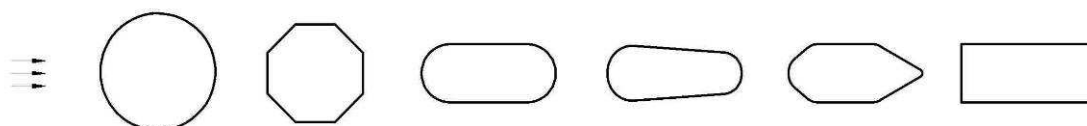
Mostní pilíře jsou spodní podpory mostů. Mohou most podpírat v celé jeho šířce nebo také jen místně. Dělí se na břehové – pilíře, které při nezvýšeném průtoku nejsou zatěžovány vodou a návodní – obtékané pilíře. Mívají nejrůznější průřezy.



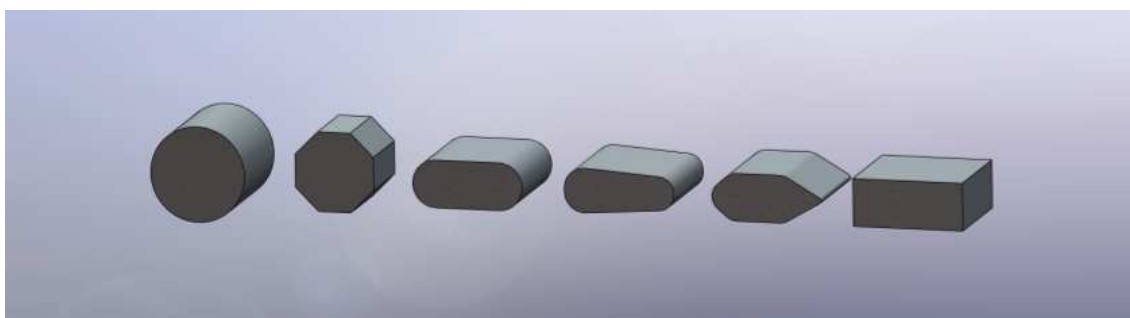
Obr. 2.5 – Podepření v celé šířce mostu  
[vlastní tvorba].



Obr. 2.6 – Místní podepření mostu  
[vlastní tvorba].

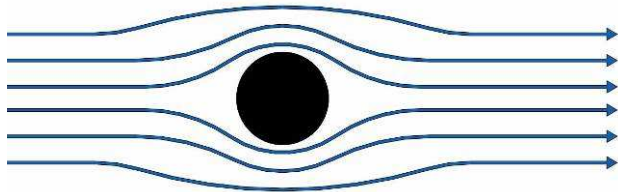


Obr. 2.7 – Průřezy pilířů – [vlastní tvorba].

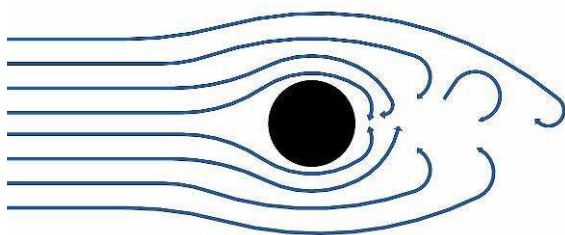


Obr. 2.8 – Modely pilířů – [vlastní tvorba].

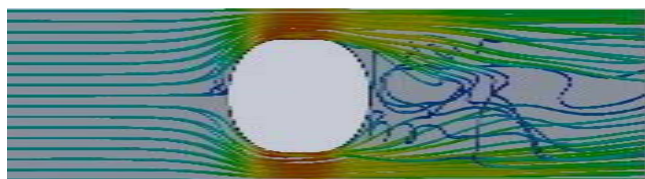
Tvar pilířů a rychlost proudění má vliv na vznik laminárního nebo turbulentního proudění za pilířem. Pokud je rychlost proudu malá, vzniká kolem pilíře většinou laminární proudění. Proudnice jsou kolem pilíře rozloženy souměrně, proto tekutina na těleso působí jen velmi malou silou. Při velké rychlosti proudění se proudnice od pilířů odtrhávají a tvoří za pilíři víry. Vzniká turbulentní proudění.



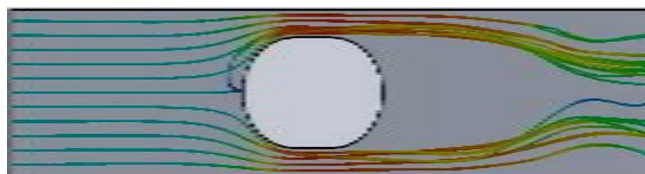
Obr. 2.9 – Laminární proudění – [vlastní tvorba].



Obr. 2.10 – Turbulentní proudění – [vlastní tvorba].



Obr. 2.11 – Laminární proudění v SolidWorks FloXpress  
[vlastní tvorba].



Obr. 2.12 – Turbulentní proudění v SolidWorks FloXpress  
[vlastní tvorba].

### Obdélníkový průřez mostního pilíře



Obdélníkové pilíře můžeme vidět často, protože stavba tohoto typu pilíře je nejsnadnější a ekonomicky nejméně náročná. Obdélníkový tvar klade tekutině největší odpor. Vznik turbulentního proudění při vyšší rychlosti tekutiny by měl být dle odhadu u tohoto průřezu nejpravděpodobnější.



Obr. 2.13 – Most s obdélníkovým průřezem pilířů, Dolní Kralovice [zdroj 6].

### Oválný průřez mostního pilíře



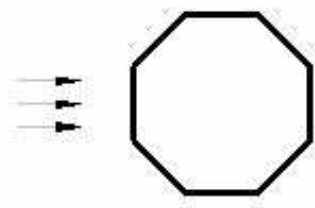
Nejrozšířenější typ mostního pilíře. Oválný tvar je příznivější než obdélníkový. Je proto vhodnější i do menších toků s větším průtokem vody.



Obr. 2.14 – Most s oválným průřezem pilířů, Brno – [zdroj 6].



## Osmiúhelníkový průřez mostního pilíře



Méně obvyklý průřez pilíře. Tyto pilíře se začaly stavět až s využíváním betonu pro stavbu mostů. Bývají to často dle rozměrů duté monolity, ale pokud mají menší rozměry i plné betonové podpěry.



Obr. 2.15 – Most s osmiúhelníkovým průřezem pilíře, Nepasice [zdroj 6].

## Oválný zužující se průřez mostního pilíře



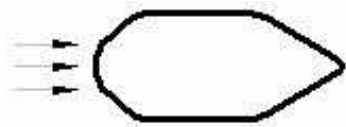
měl mít jen malý odpor.

Pilíře, které s oválným zužujícím se průřezem nalezneme v horských bystřinách, všude tam, kde hrozí rychlé stoupnutí hladiny řeky. Tento tvar by



Obr. 2.16 – Most s oválným zužujícím se průřezem pilíře, Mladotice – [vlastní tvorba].

### Rybinovitý průřez mostního pilíře



Nejvhodnějším půdorysem pilíře – pilíř se zakulacenou, mírně se rozšiřující předí a protáhlým pozvolna na zádi do špice se zužujícím trupem. Tvarem připomíná „rybí tělo“. Tento pilíř by dle dostupné literatury [zdroj 5] měl klást nejmenší odpor průtoku vody.



Obr. 2.17 – Most s rybinovitým průřezem pilíře, Žleby – [vlastní tvorba].

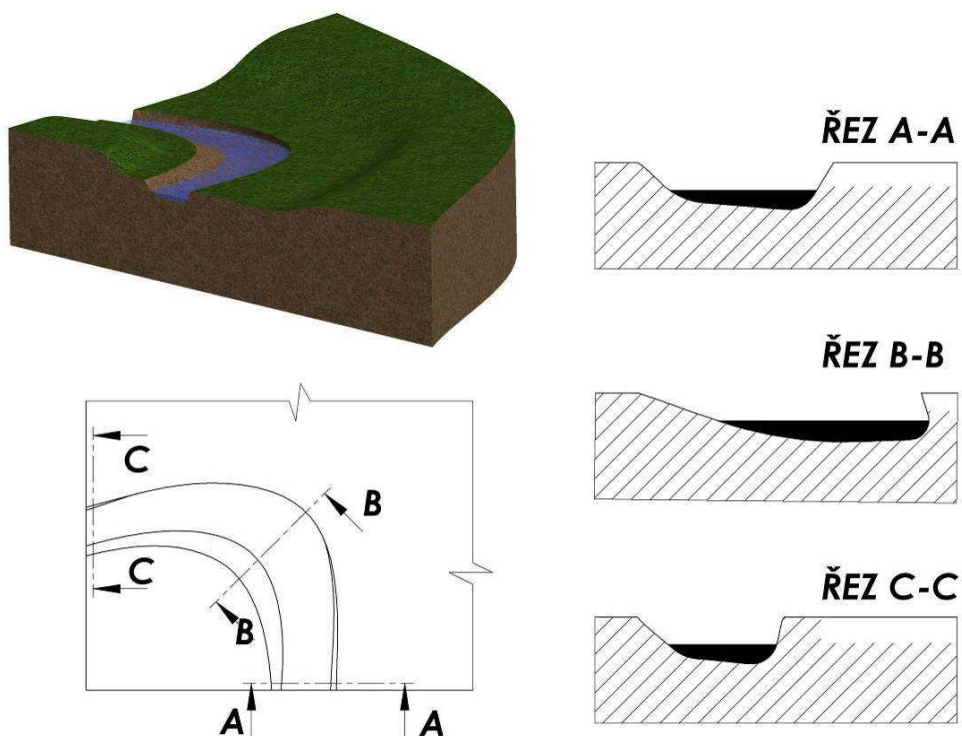


### 3 Koryta

Říčním korytem proudí voda z vyšších poloh do nižších. Koryto je charakterizováno jako ohraničení vodního toku. Skládá se ze dna a postranních břehů. V horských oblastech proud vody protéká přes kamenité dno s velkým spádem, je zde turbulentní proudění, koryta mají tvar písmene V. Dolní tok má malý spád s malou rychlostí proudu, dochází zde k laminárnímu proudění.



Obr. 3.1 – Ukázky říčních koryt – [vlastní tvorba].



Obr. 3.2 – Příklad říční eroze – [vlastní tvorba].

Ve volném toku dochází k říční erozi, která představuje podemílání břehů a tím rozšiřování koryta a také vymílání říčního dna do hloubky. Taková eroze je nežádoucí a proto se v obydlených místech provádí regulace toku, tzn. narovnání a vybetonování koryt původních potoků a řek.

### 3.1 Tvary koryt

Nejběžnější tvary regulovaných toků jsou zobrazeny níže, je zde vidět závislost rychlosti na průtoku, kde proměnnou byla v jednotlivých případech výška  $h$ . Z výšky hladiny  $h$  a dalšího parametru specifického pro daný průřez ( $b$ ,  $\alpha$ , průměr  $D$ ) byl vypočítán hydraulický průměr, z něho byl stanoven rychlostní součinitel podle Manninga. Z výsledků byla vypočtena rychlost a průtočný objem, ze kterých byl zkonstruován graf.

Při sestavování grafu bylo vycházeno ze vztahů:

Chézyho rovnice:

Jedná se o rovnici pro proudění v otevřených korytech, získáme z ní střední rychlost proudu.

$$w = C \cdot \sqrt{D \cdot i} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.1)$$

$C$ – rychlostní součinitel	$[-]$
$D$ – ekvivalentní hydraulický průměr	$[\text{m}]$
$i$ – podélný sklon koryta	$[-]$

Rovnice kontiuity:  $Q = w \cdot S \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.2)$

$S$ – průtočný průřez	$[\text{m}^2]$
$w$ – střední rychlost proudění	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

Hydraulický průměr:  $D = \frac{4 \cdot S}{o} \quad [\text{m}] \quad (3.3)$

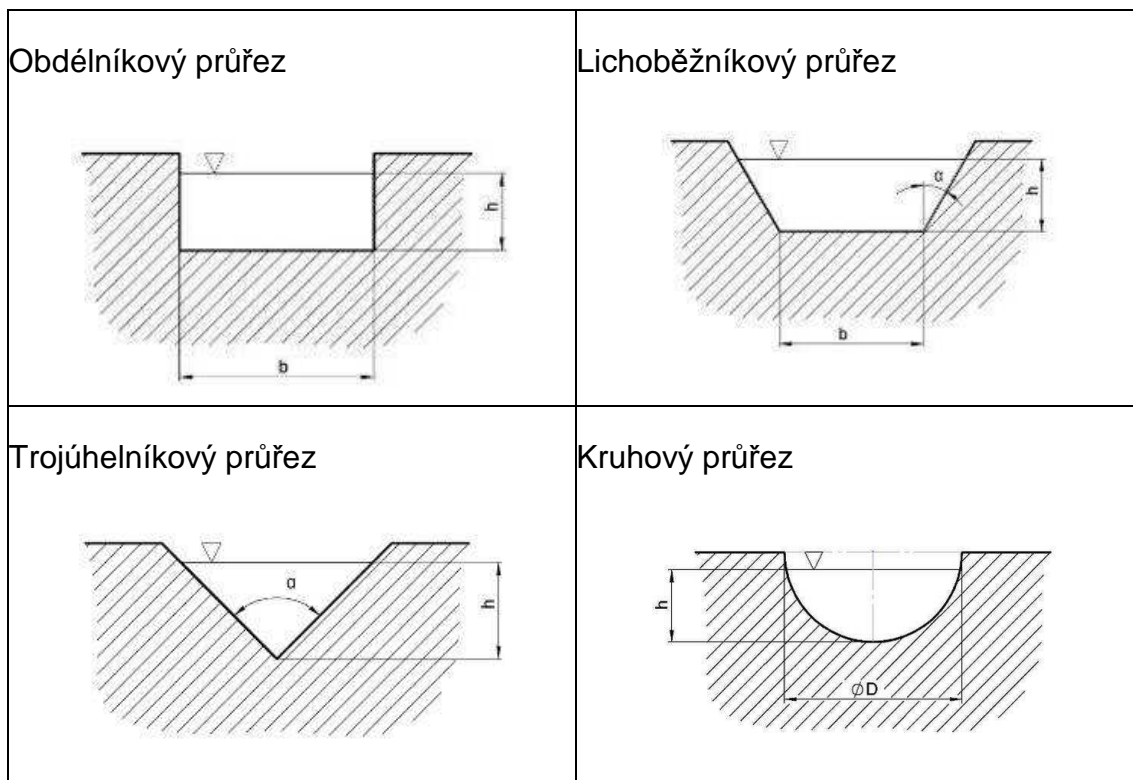
$o$ – omočený obvod	$[\text{m}]$
---------------------	--------------

Rychlostní součinitel podle Manninga:

$$C = \frac{1}{n} \cdot D^{\frac{1}{6}} \quad (3.4)$$

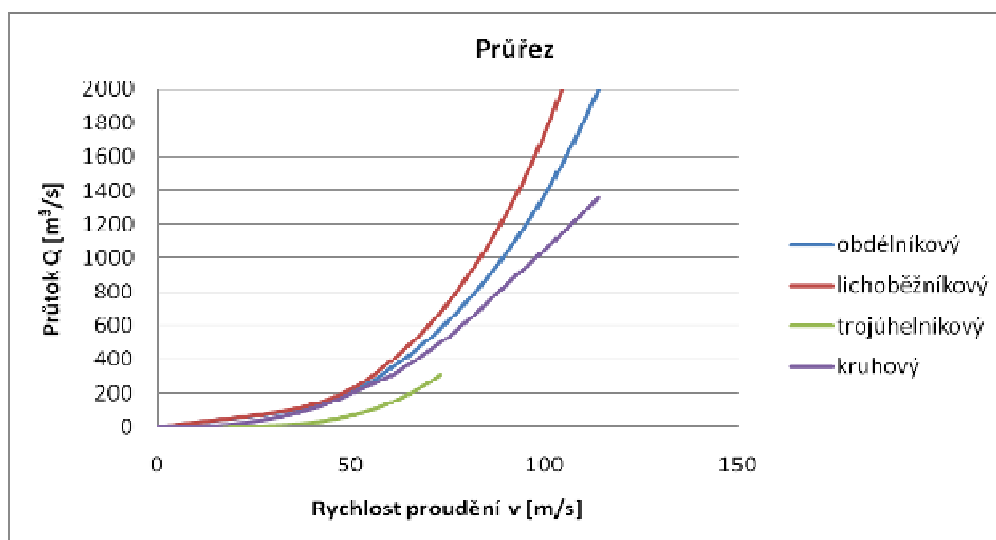
$n$ – součinitel drsnosti	$[-]$
---------------------------	-------

Hodnoty drsnostních součinitelů se uvádějí v tabulkách.



Obr. 3.3 – Průřezy koryt – [vlastní tvorba].

### 3.2 Srovnání jednotlivých průřezů koryt



Graf 3.1 – Závislost rychlosti proudění na průtoku – [vlastní tvorba].

Je žádoucí, aby korytem proteklo co nejvíce tekutiny a hladina stoupala jen velice pomalu, to splňuje lichoběžníkový průřez koryta. Tvar lichoběžníku si zachovává výhody trojúhelníku a obdélníku - výhodné zpomalování výšky hladiny při konstantním nárůstu objemového toku a rovinné dno. Proto je tedy u lichoběžníkového tvaru koryta oproti ostatním tvarům malá strmost břehů a menší celková hloubka. Používá se v dolních regulovaných tocích.



## 4 Vytipování vhodné lokality

Volbu lokality ovlivnil článek v Mladé Frontě Dnes, který pojednával o historickém mostu v Českém Krumlově. Roku 2006 byl most zapsán na seznam kulturních památek. Již 5 let se vedou spory o tuto stavbu. Most stojí v záplavové zóně, není možné ho strhnout a vytvořit odpovídající protipovodňová opatření.

### 4.1 Most pro ověření v hydrodynamické vaně



Obr. 4.1 – Historický most přes Polečnici v Českém Krumlově Chvalšinské ulici - [zdroj 12].

Most byl postaven roku 1762 z lomových kamenů. Původně měl sloužit jako knížecí cesta ze zámku Český Krumlov do letního sídla v Červeném Dvoře. Skládá se ze dvou mostních oblouků. Uprostřed toku vystupuje středový pilíř, který má půlkruhově ukončený protipovodňový náběh z kamenných kvádrů. Nedochovalo se původní zábradlí mostu, je proto nahrazeno kovovým, z původního kamenného zůstaly místy pouze patníky.



Obr. 4.2 – Historický most přes Polečnici - [zdroj 9].

## 4.2 Řeka Polečnice

Pramení na hranici CHKO Šumava u obce Polečnice. Délka toku je 30 km. Protéká jihočeským krajem, vlévá se do Vltavy na jejím 281,3 říčním kilometru. Průměrný průtok u ústí řeky je  $1,31 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Povodňové stavy na Polečnici v Českém Krumlově, data převzata ze zdr. [13]:

1. Stupeň povodňové aktivity:	100 [cm]	$15,3 [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
2. Stupeň povodňové aktivity:	140 [cm]	$28,8 [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
3. Stupeň povodňové aktivity:	170 [cm]	$39,5 [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
3. Stupeň povodňové aktivity:	337 [cm]	$130 [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ extrémní ohrožení

Sucho: 4 [cm]  $0,179 [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$

Průměrný roční stav: 37 [cm]  $1,31 [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$

$Q_n \dots n$  - leté průtoky  $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$

$Q_1$	$Q_2$	$Q_5$	$Q_{10}$	$Q_{20}$	$Q_{50}$	$Q_{100}$
19	31	51	70	93	130	163

Tab. 4.1 – Průtoky na Polečnici [zdroj 13].

Historické povodně

12.8. 2002 517 [cm]  $250 [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$

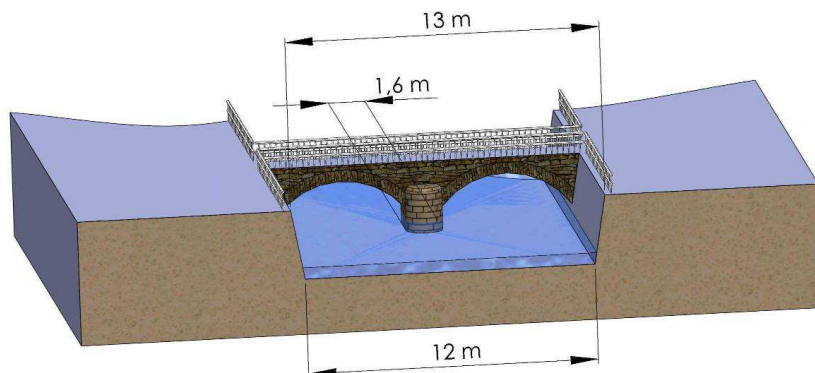
21.12. 1993 140 [cm]  $29 [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$

3.8. 1991 98 [cm]  $15 [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$

Mostek v Českém Krumlově je schopen pojmout pouze tři až desetiletou vodu.

## 4.3 Současné nevyhovující řešení

Při povodních představuje největší riziko středový pilíř. Ten pod mostní konstrukcí zmenší průřez toku a zapříčiní vzednutí hladiny. Město vyjednává s památkovým úřadem, zdali by se dalo most přemístit, otočit, popř. prodloužit.



Obr. 4.3 – Současné nevyhovující řešení - [vlastní tvorba].

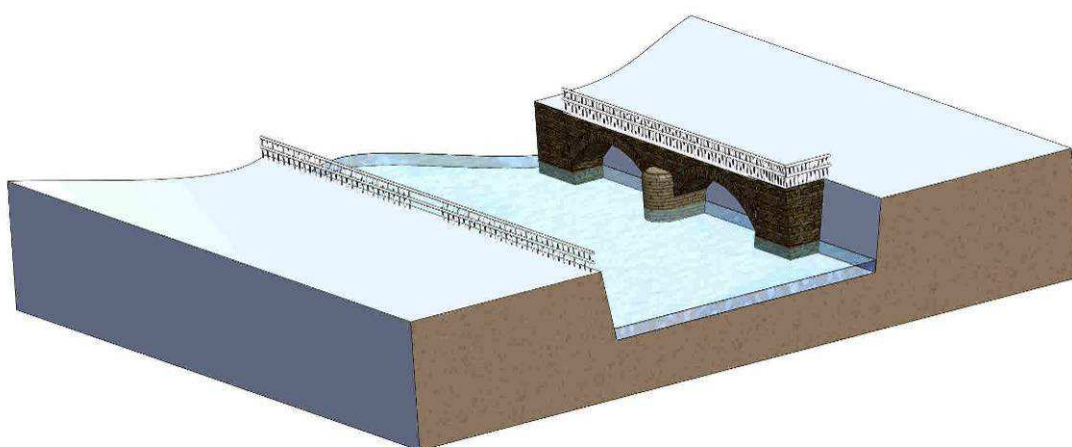
## 4.4 Možnosti realizace optimalizace přemostění na Polečnici

### 4.4.1 Přemístění mostu

V tomto případě by bylo potřeba most rozebrat a znovu sestavit na jiném bezpečnějším místě. S tím památkový úřad nesouhlasí. Došlo by ke znehodnocení stavby.

### 4.4.2 Otočení mostu o 90°

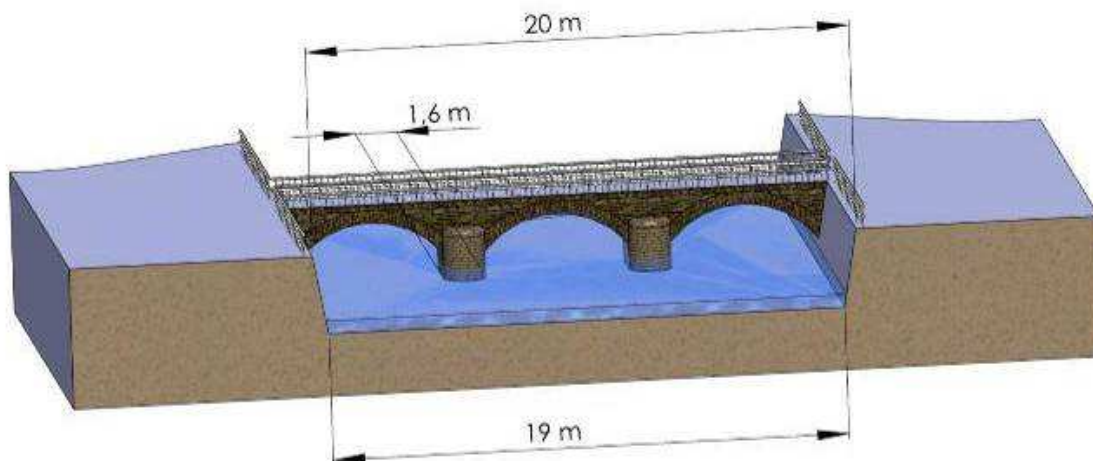
Předpokládá se, že by se most otočil a přesunul ke břehu. Most by však stále zůstal v korytě a tvořil by překážku. Koryto řeky by se v případě potřeby mohlo rozšířit. Památka by zůstala zachována na stejném místě, pouze by její krásnou historickou klenbu bylo možné prohlížet a obdivovat z jiného úhlu.



Obr. 4.4 – Otočení mostu o 90° - [vlastní tvorba].

### 4.4.3 Prodloužení mostu o další oblouk

Další variantou by mohlo být rozšíření toku řeky Polečnice a rozšíření mostu o další oblouk. Historická stavba by mohla zůstat zachována. Průtok řeky by se zvětšil.



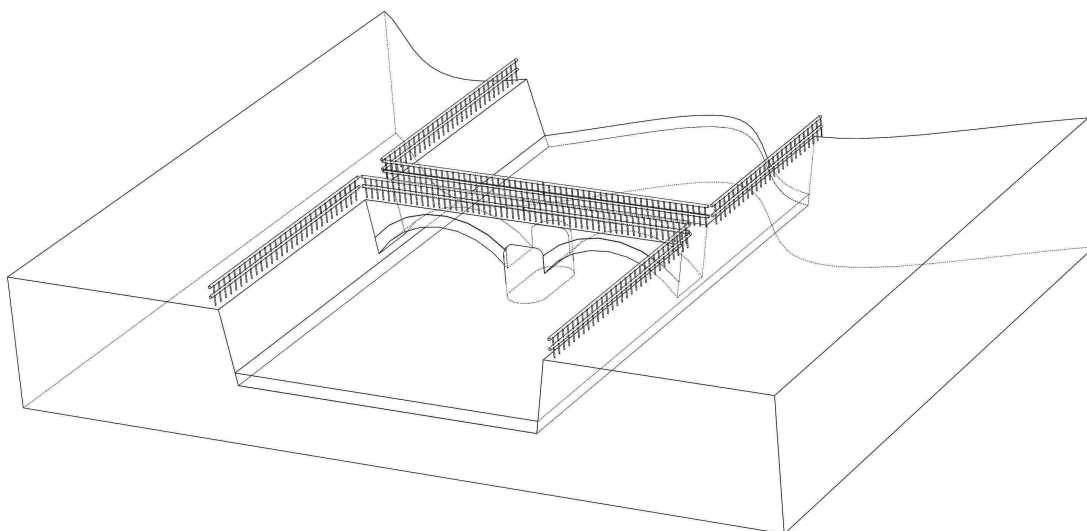
Obr. 4.5 – Prodloužení mostu o další oblouk - [vlastní tvorba].

## 5 Modelování v programu SolidWorks

Pro potřeby závěrečné práce bylo zapotřebí získat rozměry mostu, jeho pilíře a míry říčního koryta. Po rozhovoru se zástupcem města Český Krumlov, který se zabývá dokumentací starých objektů v tomto městě, bylo zjištěno, že k mostu přes Polečnici, neexistuje původní dokumentace a novodobé zpracování zatím není k dispozici. Z tohoto důvodu byl most přibližně odměřen a pro názornost vymodelován v konstrukčním programu SolidWorks. Zjištěné rozměry byly též využity pro výrobu modelů z plexiskla pro simulaci v hydrodynamické vaně.

Program SolidWorks byl pro účely závěrečné práce vypůjčen od firmy TechDesign.

Je to plně parametrický software, má příjemné uživatelské prostředí a velice snadno se v něm může orientovat i naprostý začátečník. Došlo k vymodelování říčního koryta v měřítku 1:1. Dále byl vytvořen most včetně středního pilíře a nasimulován průtok vody. Potažení dokončených modelů texturou obsaženou v programu SolidWorks dodalo modelům reálný vzhled a přispělo k názornosti. Získané obrázky ve formátu jpg jsou použity v této práci. Kromě mostu byly vymodelovány v programu SolidWorks i eroze říčního břehu, průřezy koryt, typy mostních konstrukcí a tvary pilířů. Hlavním využitím vytvořeného modelu mostu je simulace obtékání ve FloXpress.



Obr. 5.1 – Ukázka práce v SolidWorks - [vlastní tvorba].

## 6 Simulace proudění ve FloXpress

### 6.1 Popis vizualizace

Samotná simulace proudění proběhla v programu FloXpress, který je integrován do programu SolidWorks. Jedná se o nástroj analyzující, jakým způsobem voda obtéká vytvořenou geometrii. FloXpress nebere v úvahu ztráty tlaku, rychlosti průtoku atd.

Vstupní data:

Volba kapaliny

Určení přívodu

Zadání tlaku, objemového nebo hmotnostního průměru

Určení vývodu

Výstupní data:

Znázornění proudnic na obrázcích nebo animace. Proudnice jsou barevně rozlišené dle rychlosti proudění v  $\text{m.s}^{-1}$ .

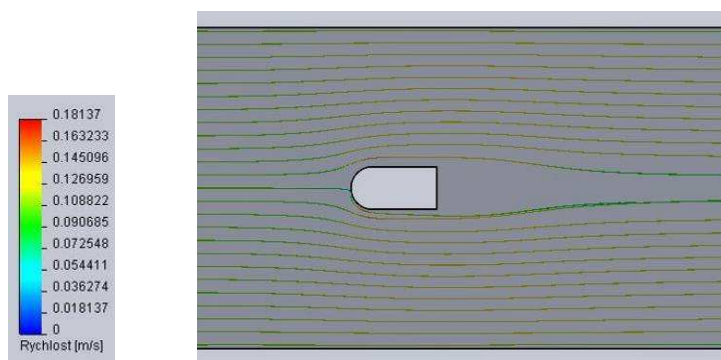
Funkce	SolidWorks FloXpress
3D-tok	✓
Animace	✓
Trajektorie toků	✓
Analýza sestav	✓
Analýza dílu	✓
Mezní podmínky toku otvorem	✓
Mezní podmínky tlaku na otvor	✓
Problémy ustáleného stavu	✓
Vnitřní problémy	✓

Obr. 6.1 – Funkce FloXpress - [zdroj 15].



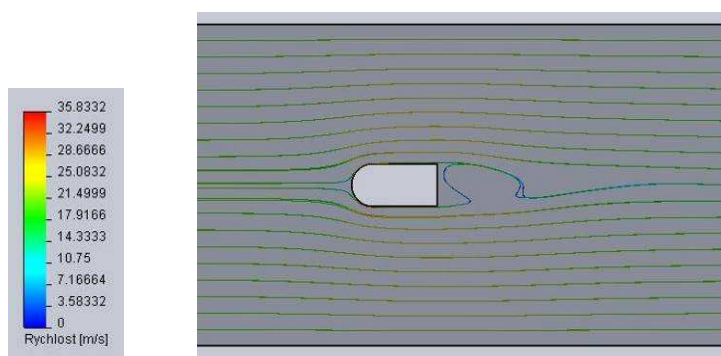
## 6.2 Výstupy z FloXpress

### Současný stav



Obr. 6.2 – Vizualizace průměrného průtoku  $1,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Při průtoku  $1,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  za pilířem tvaru obdélníku se zaoblenou náběžnou hranou – současný stav pilíře mostu, nevznikají v programu FloXpress žádné poruchy proudění. Rychlost je největší v místě zúžení vychází  $0,18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

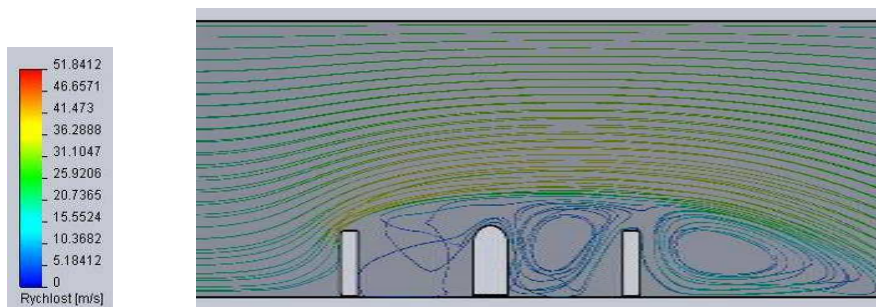


Obr. 6.3 – Vizualizace průtoku při povodních  $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Při průtoku  $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  za pilířem současného mostu vzniká víření. Největší rychlost je opět v místě zúžení proudu.

Ohrožení vzniká především při velkém průtoku, proto byly následující simulace - otočení mostu o  $90^\circ$ , prodloužení mostu a simulace pro různé typy průřezů pilířů provedeny pouze při průtoku odpovídajícím povodním.

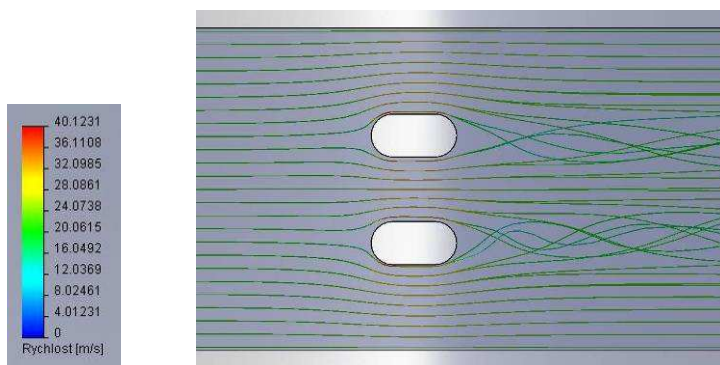
### Proudění v případě otočení mostu o 90°



Obr. 6.4 – Vizualizace průtoku při povodních  $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Při otočení mostu o 90°, za druhým a třetím pilířem vzniká mohutné víření. O něco menší víření lze vidět za prvním pilířem ve směru toku řeky. Za třetím pilířem vzniká dlouhý úplav.

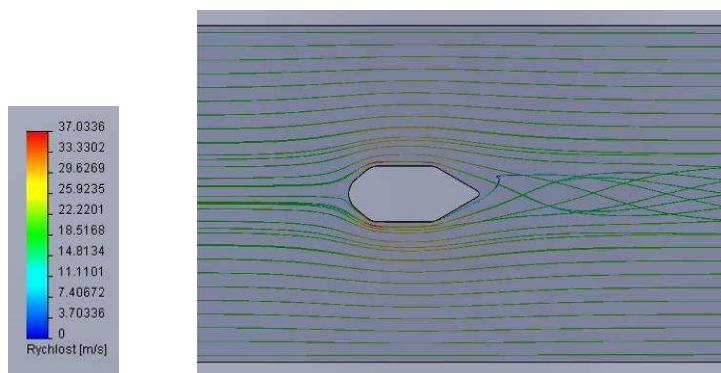
### Proudění v případě prodloužení mostu a opravení náběžných hran



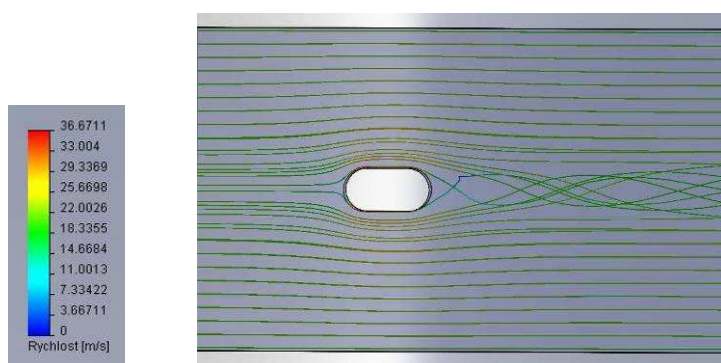
Obr. 6.5 – Vizualizace průtoku při povodních  $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Pokud by došlo k prodloužení mostu o jeden pilíř proud mezi pilíři se urychluje a vlivem podtlaku se úplavy k sobě přibližují. Za jednotlivými pilíři vzniká dlouhý úplav.

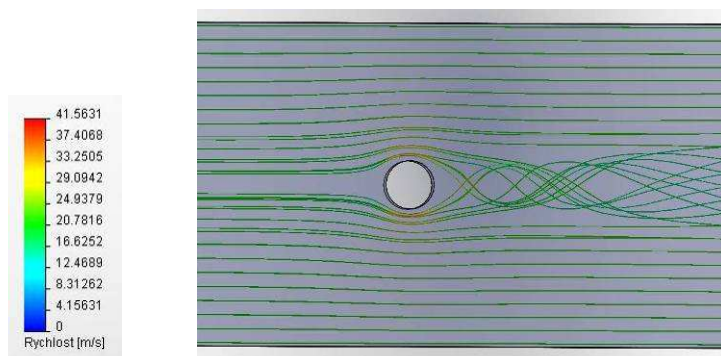
## Proudění v případě využití jiných průřezů pilířů



Obr. 6.6 – Vizualizace průtoku při povodních  $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .



Obr. 6.7 – Vizualizace průtoku při povodních  $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .



Obr. 6.8 – Vizualizace průtoku při povodních  $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Vizualizace průtoku při povodních  $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  u různých pilířů.

Simulace proběhla za stejných podmínek, tj. při stejné velikosti průtoku, stejném průřezu koryta a stejné šířce pilířů. Nejkratší úplav se jeví u rybinovitého průřezu viz obr. 6.6, také rychlost u tohoto průřezu je nejmenší. Naopak největší rychlost a nejdelší úplav vzniká u kruhového průřezu, viz obr. 6.8.

## 7 Hydrodynamická podobnost pro stanovení modelu

Matematické vyjadřování v hydrodynamice ideálních tekutin má mnoho úskalí. Tyto úskalí se ještě zvyšují při počítání s reálnými tekutinami. Proto se při řešení často využívají praktická měření, pokusy a v dnešní době hlavně počítačové simulace. Aby bylo možné srovnávat obtékání modelu se skutečným obtékáním pilíře, musí být splněny jisté podmínky, kterými se zabývá vědní obor zvaný teorie podobnosti.

Podmínky, které musí být zachovány:

1. Geometrická podobnost – vytvořit model v určitém měřítku.
2. Kinematická podobnost - tato podobnost vyžaduje, aby poměr odpovídajících rychlostí a zrychlení na modelu a díle byl konstantní.
3. Dynamická podobnost - poměr odpovídajících sil na modelu a na díle byl konstantní.

Splnění dynamické podobnosti bývá složité, protože v mechanice tekutin se vyskytuje mnoho sil. Poměr hlavních setrvačných a třecích sil udává nejznámější podobnostní číslo, Reynoldsovo. Podobnost bude splněna, pokud  $Re_{\text{modelu}} = Re_{\text{pilíře mostu}}$ .

Výpočet  $Re$

$$Re = \frac{w \cdot D}{\nu} \quad [-] \quad (7.1)$$

$w$  – střední rychlost proudění  $[m \cdot s^{-1}]$

$D$  – ekvivalentní hydraulický průměr  $[m]$

$\nu$  – kinematická viskozita  $[m^2 \cdot s^{-1}]$

Pomocí Reynoldsova čísla se nechá přibližně určit, zdali vzniká laminární nebo turbulentní proudění.

Laminární proudění  $Re < 2320$

Přechodová oblast  $2320 < Re < 4000$

Turbulentní proudění  $Re > 4000$

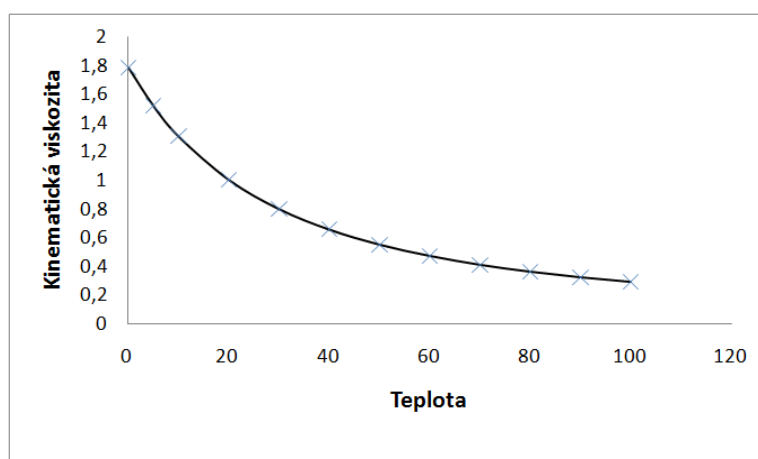
## Viskozita

Viskozita (vazkost) tekutiny se projevuje při pohybu kapalin. Je způsobena mezimolekulárními silami.

Sousední vrstvy kapaliny se pohybují různými rychlostmi a na jejich rozhraní vzniká smykové tření. Pomalejší vrstvy jsou zrychlovány, rychlejší zpomalovány. Zmenšení rychlosti způsobuje tečná síla, kterou působí vnitřní tření kapaliny – viskozita.

Viskozita se mění v závislosti na změně teploty. U kapalin viskozita s rostoucí teplotou klesá.

Teplota [°C]	Kinematická viskozita .10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s
0	1,787
5	1,519
10	1,307
20	1,004
30	0,801
40	0,658
50	0,553
60	0,475
70	0,413
80	0,365
90	0,326
100	0,294



Tab. 7.1 - Závislost viskozity na teplotě – [zdroj 14].

Proudění v korytech především ovlivňuje:

1. geometrie koryta (plocha a tvar průřezu, sklon dna, drsnost rozhraní)
2. hloubka vody v korytě
3. průtok v korytě

Pro snadnější stanovení rychlosti proudění bude při simulaci v hydrodynamické vaně vytvořen obdélníkový průřez koryta. Laminárním prouděním má v tomto průřezu rychlostní profil ve tvaru paraboly a proud kapaliny má tvar osově rozříznutého paraboloidu, přičemž plocha řezu je totožná s hladinou kapaliny. V přechodové oblasti se vrchol paraboloidu zplošťuje, vzniká turbulentní čelo a u turbulentního proudění je toto čelo rozšířeno skoro přes celý průřez.

## 7.1 Přepočet průtoku ze skutečného koryta na model

Vstupními údaji u skutečného koryta je šířka, kinematická viskozita, výška hladiny, průtok. U modelu šířka vany, výška hladiny tekutiny.

Skutečné koryto				
L [m]	12			
$\nu$ [m <sup>2</sup> /s]	1,00E-06			
h [m]	Q [m <sup>3</sup> /s]	w [m/s]	D [m]	Re [-]
0,37	1,31	0,30	1,39	411303
1,7	39,5	1,94	5,30	10259740

Tab. 7.2 – Výpočet Reynoldsova čísla pro skutečné koryto.

Model				
L [m]	0,3			
h [m]	Q [m <sup>3</sup> /h]	w [m/s]	D [m]	Re [-]
0,02	0,20	0,01	0,07	654
0,02	0,40	0,02	0,07	1307
0,02	0,60	0,03	0,07	1961
0,02	0,80	0,04	0,07	2614

Tab. 7.3 – Výpočet Reynoldsova čísla pro model

Bylo vycházeno ze vztahů:

$$\nu = \frac{Q}{h \cdot l} \quad (7.2)$$

$$D = 4 \cdot \frac{h \cdot l}{2 \cdot h + l} \quad (7.3)$$

A ze vztahu (7.1)

L – šířka koryta

$\nu$  - kinematická viskozita

h – výška hladiny

Q – průtok

w – střední rychlost proudění

D - ekvivalentní hydraulický průměr

Pro zjednodušení bereme v úvahu rovné dno řeky. Závislost viskozity vody na teplotě je zanedbána, teplota je konstantní. Spád na tomto krátkém úseku není brán v úvahu. Přepočtené rychlosti ze skutečného koryta na model nebylo možné dodržet, protože to neumožňuje vodovodní síť laboratoře. Proto bylo Reynoldsovo číslo stanoveno zvlášť pro skutečnost a model a nemohlo být tedy zachováno. Zachována byla stejná viskozita a poměr rozměrů u skutečného mostu a modelů. Experimentálně byly vybrány rychlosti tak, aby bylo patrné vytvoření vírů.

## 8 Experiment v hydrodynamické vaně

### 8.1 Popis hydrodynamické vany

[3] - Hydrodynamická vana je tvořena svařovaným rámem modelového stolu o velké tuhosti, v němž je vodorovně usazena broušená skleněná deska o tloušťce 10 mm a rozměrech 2200 x 1000 mm. Sklo tvoří pracovní prostor vany. Leží na 50-ti stavitelných podpěrách, z nichž 44 je rozmístěno po obvodu, zbývajících 6 je ve střední části skla a zamezuje průhyb skla. Mezi sklem a rámem je pružné těsnění. Toto uložení umožňuje vyrovnaní horizontální polohy s přesností setin milimetru.

Experimenty jsou sledovány přímo na zařízení anebo na monitoru, připojeném přes videokameru. K záznamu je používána videokamera nebo fotoaparát se samospouští nebo časováním. Držáky záznamových zařízení (fotoaparátu a videokamery) jsou součástí pohyblivé části stolu. Podélnou polohu záznamového zařízení nad pracovní plochou lze měnit pojížděním po kolejnicích na rámu stolu, příčná poloha a vzdálenost kamery a fotoaparátu od objektu se upravuje posuvy a objímkami se šrouby.

K osvětlení slouží čtyři halogenové lampy s nastavitelnou polohou. Před lampami je zavěšena mléčná fólie, která zlepšuje rozptyl světla.

Na začátku a na konci stolu jsou regulační komory pro přívod a odvod vody. Konstrukce přívodu a odvodu jsou stejné, umožňují tak změnu směru průtoku kapaliny.

Regulace výšky hladiny a směru proudění je prováděna hradítky ve vstupní a výstupní komoře. Jsou-li všechna hradítka ve stejné výšce, kapalina přestane proudit.

Systém je koncipován jako otevřený, a to z důvodu čistoty a jednoduchosti. Proudící kapalinou je voda z vodovodní sítě. Objemový průtok lze kontrolovat rotametrem, zapojeným na přívodním potrubí. Maximální hodnota objemového průtoku je vzhledem k možnostem sítě 860 litrů za hodinu.

Součástí hydrodynamické vany je zásobník barviva o objemu 18 litrů, umístěný nad rovinou modelového stolu a zásobník zviditelňovací disperze o objemu 0,5 litrů, jenž je součástí stříkací pistole.

## 8.2 Způsoby vizualizace proudění

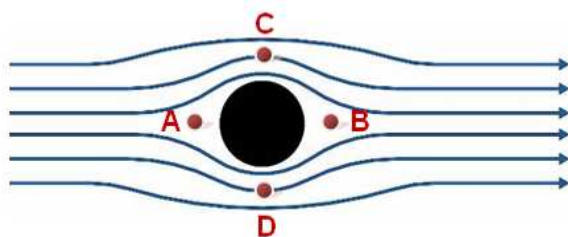
Vizualizační metody slouží k lepšímu pozorování proudnic, úplavů, mezních vrstev a tvorby vírů. Nejčastěji se využívá obarvené vody, do níž se přidávají prachové částice takové barvy, aby došlo ke správnému kontrastu. Tyto částice se pak pohybují s tekutinou a vytváří obraz proudění. Další možná metoda zviditelňování je připevnění nitěných sond na model. Tyto sondy se za modelem pohybují podle vzniklého proudění.



Obr. 8.1 – Ukázka náběhu prachových částic v hydrodynamické vaně [vlastní tvorba].

## 8.3 Popis vizualizace

U ideálních kapalin dochází v místech C a D ke zhuštění proudnic, snížení tlaku a tím zvýšení rychlosti. V bodě A se proudnice odtrhávají a v bodě B se opět spojují, proto je zde nulová rychlost. Při zanedbání viskozity je tedy před bodem A a za bodem B stejná rychlost.



Obr. 8.2 – Zobrazení proudnic u ideální kapaliny [vlastní tvorba].

U reálných kapalin tekutina k tělesu přilne. Rychlost proudění je na povrchu tělesa nulová a se vzdáleností od tělesa se zvětšuje. Tato tenká vrstva, kdy rychlost stoupá od nulové hodnoty až na rychlost v bodě C a D se nazývá mezní vrstvou. Vlivem nepříznivého tlakového gradientu se může proud začít v mezní vrstvě vracet, vytvoří se zpětný proud a za tělesem vznikne vír. Toto víření nebo odtržení mezní vrstvy bez tvorby vírů se nazývá úplav.



## 8.4 Postup experimentu

Modely pro posouzení v hydrodynamické vaně byly vytvořeny z 2,5 cm silného plexiskla. Zmenšení oproti skutečnosti je 1:40. Do spodní plochy modelů byly vyvrtány dva otvory pro tmel, tak aby bylo možno model připevnit ke dnu vany a zajistit proti pootočení.

Vana byla nejprve vyčištěna a následovala stavba trati. Po vyměření vhodného místa pro upevnění modelu došlo k napuštění celé vany a zkontrolování funkčnosti. Na rotametu s průtokem do  $800 \text{ l.h}^{-1}$  byl nastaven první průtok. Po obarvení vody roztokem saturnové černi A1341 v koncentraci 5 gramů na litr vody se pomocí rozprašovací pistole nanasly prachové částice na hladinu obarvené vody. Prachové částice tvořil hliníkový prášek ALPU se zrnitostí 35 mikrometrů. Na hladině černé vody se rozptýlil tenký hliníkový film. Po ustálení průtoku se přistoupilo k záznamu experimentu.

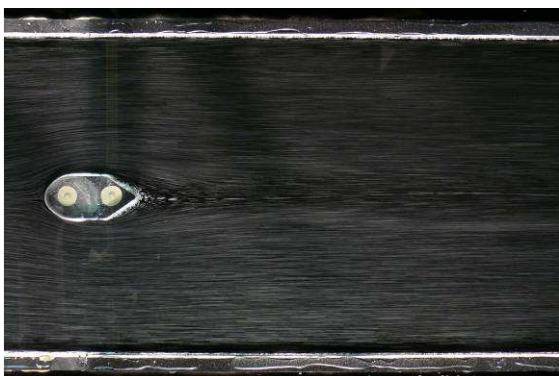
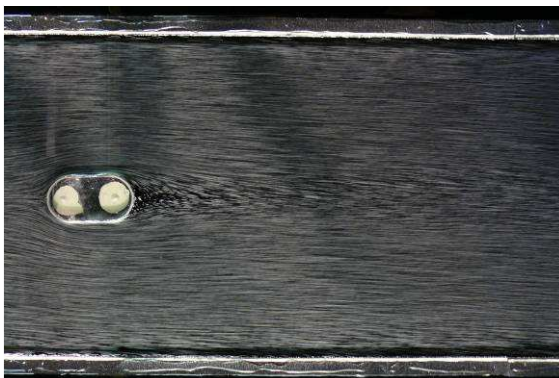
Experimentální měření probíhalo při průtocích 0,2; 0,4; 0,6;  $0,8 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ . Odsimulován byl nejdříve pilíř současného průřezu, tj. obdélník se zaoblenou náběžnou hranou. Poté při všech průtocích proběhla simulace i u ostatních průřezů pilířů – oválný, kruhový, rybinovitý. Následně bylo koryto zúženo, aby se zvýšila rychlost a mohlo dojít k porovnání úplavů při různých rychlostech, opět pro všechny typy pilířů.

Po simulaci jednotlivých průřezů, bylo v hydrodynamické vaně vyzkoušeno obtékání mostu otočeného o  $90^\circ$ . Při pravé straně koryta po směru proudění byl připevněn obdélníkový pilíř se zaoblenou náběžnou hranou, před něj a za něj na odpovídající vzdálenosti délky mostu byly umístěny podpěry obou konců mostu. Simulace opět proběhla při všech čtyřech průtocích.

Následně bylo ověřeno proudění v případě prodloužení mostu a opravení náběžných hran - při všech průtocích.

## 8.5 Vizualizace měření v hydrodynamické vaně

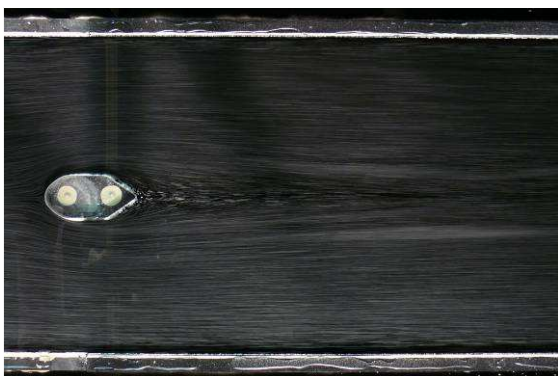
Na následujících stranách 35 až 38 jsou výstupy z měření v hydrodynamické vaně. Levý sloupec znázorňuje přepočtenou délku koryta odpovídající 30 cm, pravý sloupec zúžení koryta na 20 cm, aby došlo ke zvýšení rychlosti a zvýraznění úplavů za pilíři. Ve sloupcích jsou k vidění různé typy pilířů, simulované za stejných podmínek. Průtok regulovaný plováчковým rotametrem a střední rychlost proudění je pod každým sloupcem uvedena.



rychlost 0,013 m.s<sup>-1</sup>

rychlost 0,020 m.s<sup>-1</sup>

Obr. 8.3 průtok 0.2 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>

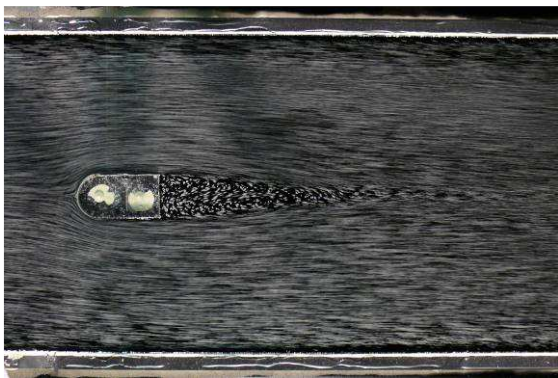


rychlost  $0,026 \text{ m.s}^{-1}$

rychlost  $0,040 \text{ m.s}^{-1}$

Obr. 8.4 průtok  $0,4 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ .

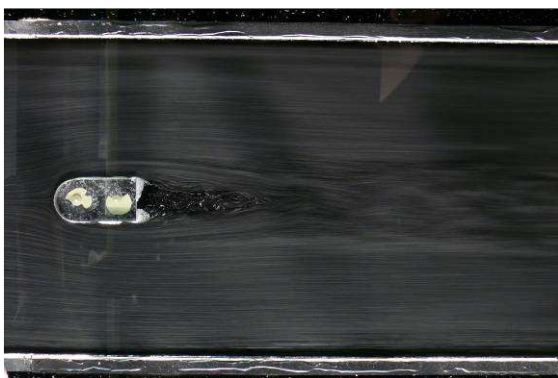




rychlost  $0,040 \text{ m.s}^{-1}$

rychlost  $0,060 \text{ m.s}^{-1}$

Obr. 8.5 průtok  $0,6 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ .

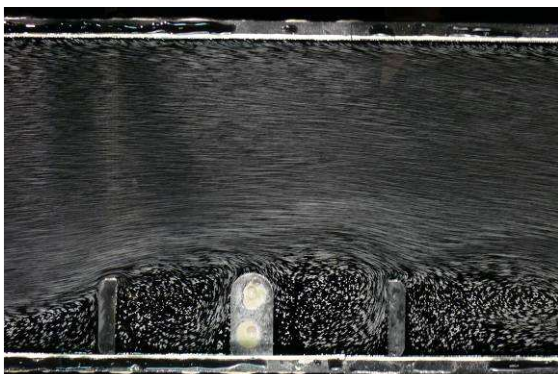


rychlost  $0,053 \text{ m.s}^{-1}$

rychlost  $0,080 \text{ m.s}^{-1}$

Obr. 8.6 průtok  $0,8 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ .

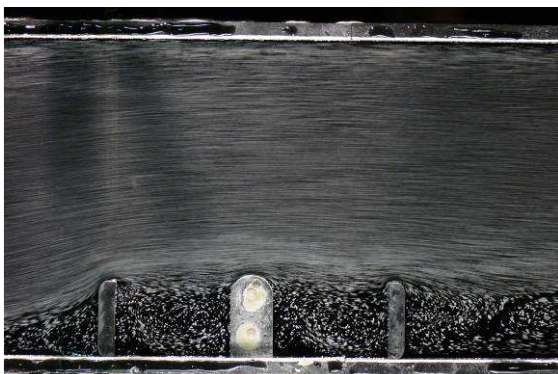




Průtok  $0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; rychlost  $0,013 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



Průtok  $0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; rychlost  $0,020 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



Průtok  $0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; rychlost  $0,026 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



Průtok  $0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; rychlost  $0,040 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



Průtok  $0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; rychlost  $0,040 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



Průtok  $0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; rychlost  $0,060 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

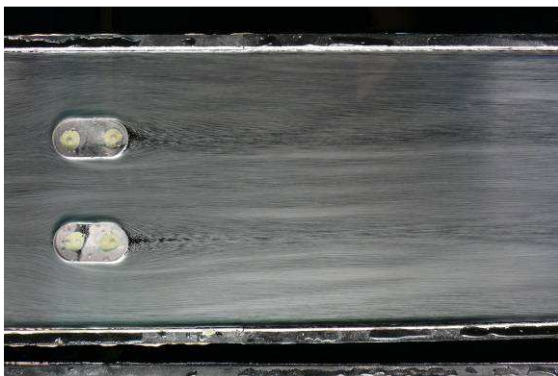


Průtok  $0,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; rychlost  $0,053 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



Průtok  $0,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; rychlost  $0,080 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

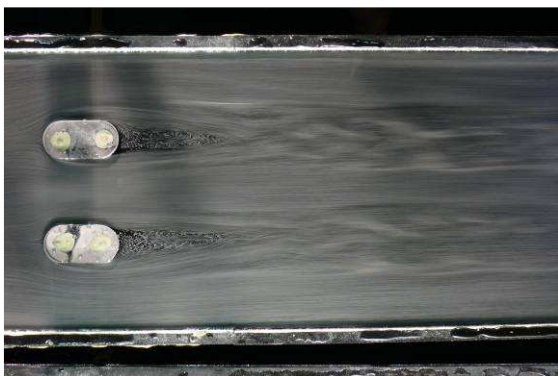
Obr. 8.7 – Obtékání otočeného mostu při různých průtocích



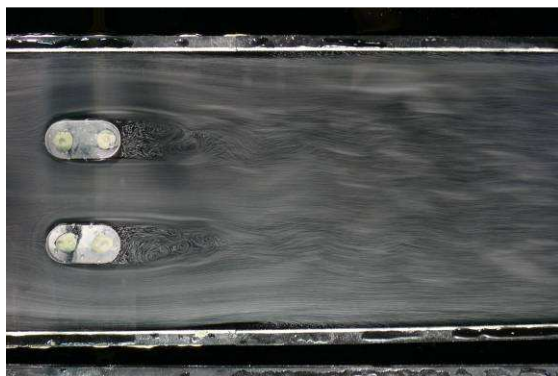
Průtok  $0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; rychlost  $0,013 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



Průtok  $0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; rychlost  $0,026 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



Průtok  $0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; rychlost  $0,040 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



Průtok  $0,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; rychlost  $0,053 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Obr. 8.8 Obtékání dvou pilířů mostu při různých průtocích

## 9 Výsledy experimentální části

V hydrodynamické vaně je simulováno proudění ve 2D. Při reálném průtoku vody korytem řeky dochází k poruchám i ve směru od hladiny ke dnu. Pokud se vyskytne porucha, tedy vír, ve 2D, bude tato porucha zaručeně i od hladiny ke dnu. V reálném korytě dochází v místě urychlení proudu tekutiny k vymílání říčního dna. Naopak tam, kde rychlost klesá, se usazuje to, co voda přinesla. Z experimentů v hydrodynamické vaně lze zjistit dle zhuštění proudnic, kde dochází ke zrychlení proudění a je proto možné předpokládat případné vymílání nebo usazování částic na dně toku.

Na stranách 35 - 38 nalezneme porovnání jednotlivých typů pilířů při stejných podmínkách. Pro lepší viditelnost byla v příloze zvětšena simulace největšího průtoku a největší rychlosti u všech průřezů tj  $0,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a  $0,080 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Při tomto průtoku a rychlostech již u všech průřezů dochází k odtržení mezní vrstvy a k tvorbě vírů.

V příloze číslo 2 je znázorněno a popsáno odtržení mezní vrstvy a tvorby vírů. Za povšimnutí stojí obr. 2, kde dochází k odtržení mezní vrstvy hned za čelem pilíře. Víry se tvoří nejen za pilířem, ale vrací se zpět podél těla pilíře téměř až k čelu.

### 9.1 Porovnání zřetelných odlišností u jednotlivých průřezů pilířů

Snímky ze strany 35

Při průtoku  $0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a rychlosti  $0,013 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  nevznikají u většiny průřezů téměř žádné víry. U pilíře tvaru rybníky proudnice kopírují tvar pilíře, jsou stále rovnoběžné a po překážce se vrací do původního stavu. Naopak u průřezu obdélníka se zaoblenou náběžnou hranou už i při nízké rychlosti dochází k odtržení mezní vrstvy. To zapříčiňuje dlouhý úplav a tvoření vírů za pilířem. Pokud stoupne rychlost na  $0,02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  jevy jsou u všech průřezů pilířů o něco více patrnější.

Snímky ze strany 36

Při průtoku  $0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a rychlosti  $0,026 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  je již u oválného pilíře patrný úplav s tvorbou vírů za pilířem, zatím co u průtoku  $0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a rychlosti  $0,013 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  byl pouze náznak úplavu. U kruhového průřezu pilíře se začínají tvořit víry, zřetelněji u průtoku  $0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a rychlosti  $0,040 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .



Snímky ze strany 37

Při průtoku  $0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  a rychlosti  $0,040 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  u všech pilířů i za rybinovitým je patrné víření, při zvýšení rychlosti na  $0,060 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  je tvorba víření i délka úplavu znatelnější.

Snímky ze strany 38

Při průtoku  $0,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  a rychlosti  $0,080 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  jsou víry a úplavy největší. Experimentální měření dokazuje, že při nárůstu průtoku a rychlosti dochází ke vzniku větších poruch. Při porovnání s ostatními průřezy vzniká neužší a nejkratší úplav opět za průřezem tvaru rybiny.

## 9.2 Celkové hodnocení typů průřezů pilířů

V tabulce jsou hodnoceny jednotlivé typy pilířů obtékané v hydrodynamické vaně. Porovnávána je délka, šířka úplavu a vznik vírů za průřezy. Hodnocení je provedeno pomocí známek od 1 do 4. Přičemž známka 1 znamená nejlépe hodnocený pilíř vůči ostatním, známka 4 nejhůře hodnocený pilíř.

Průtok $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$		0,2	0,2	0,4	0,4	0,6	0,6	0,8	0,8	Průměrné hodnocení
Rychlost $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		0,01	0,02	0,03	0,04	0,04	0,1	0,05	0,1	
Průřez pilíře	Obdélníkový se zaobl. náběž. h	4	3	4	3	4	4	3	3	3,5
	Oválný	3	3	3	2	2	3	1	2	2,4
	Kruhový	2	2	2	2	3	2	2	3	2,3
	Průřez typu rybiny	1	1	1	1	1	1	1	1	1,0

Tab. 9.1 – Hodnocení průřezů pilířů na základě simulace v hydrodynamické vaně - [vlastní tvorba].

Z měření v hydrodynamické vaně vyplynulo, že srovnáme-li jednotlivé typy průřezů pilířů, nejlépe hodnocený průřez je rybinovitý, následuje kruhový, který je téměř srovnatelný s oválným. Nejhůře hodnoceným je obdélníkový se zaoblenou náběžnou hranou.

## 9.3 Aplikace na vybranou lokalitu

Most otočený o  $90^\circ$  umístěný u břehu.

Při průtoku  $0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  a rychlosti  $0,013 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  voda pilíře obtéká s minimálním vznikem vírů mezi pilíři. Při porovnání snímků průtoku  $0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  o rychlosti  $0,013 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a snímku o stejném průtoku při rychlosti  $0,020 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  je znatelně

vidět, že úplav se při vyšší rychlosti výrazně zužuje. Se stoupajícím průtokem a rychlostí se zvětšují víry za jednotlivými pilíři. Průtok  $0,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  a rychlost  $0,080 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  má výrazné víry mezi pilíři a zužující se úplav. Řešení otočením mostu se dle vizualizace jeví jako nejhorší varianta.

#### Prodloužený most

Proudění za jednotlivými pilíři v případě prodloužení mostu vypadá tvarem úplavu podobně jako v případě obtékání u jednoho pilíře s tím rozdílem, že proud mezi pilíři se urychluje a vlivem podtlaku se úplavy k sobě přibližují. Mezi pilíři by v reálném korytě docházelo k vymílání říčního dna. Při rozšíření koryta by se zvětšil průtočný profil, rychlost by se při zvětšeném průtočném profilu snížila a víry při nižší rychlosti jsou dle pokusu v hydrodynamické vaně znatelně menší. Tato varianta řešení by z hlediska obtékání byla výhodnější než otočení mostu o  $90^\circ$ .

### 9.4 Porovnání studie z FloXpress a výsledků z hydrodynamické vany

Výstupem z FloXpress je technická zpráva s obrázky a možnost spuštění simulace obtékání v programu SolidWorks. Výhoda je v barevném rozlišení rychlosti proudnic a v možnosti nastavení hustoty proudnic. Nevýhoda FloXpress je v omezené možnosti zadávání vstupních podmínek. Pro větší přiblížení se ke skutečnosti by bylo třeba k simulaci použít nadstavbu SolidWorksu FloSimulation, případně jiné programy např. Fluent.

Porovnáme-li simulace obtékání obdélníkového průřezu se zaoblenou náběžnou hranou, tak při malých průtocích ve FloXpress dochází k odtržení mezní vrstvy a dlouhému úplavu, aniž by se za pilířem tvořily víry. V hydrodynamické vaně dochází k odtržení proudnic s tvorbou vírů.

Srovnáme-li obtékání všech průřezů ve FloXpress s obtékáním pilířů v hydrodynamické vaně dojdeme k podobným výsledkům. Optimálním pilířem pro krátký a úzký úplav je v obou případech rybina. V případě obtékání prodlouženého mostu dochází u obou způsobů vizualizace k urychlení proudu mezi pilíři, úplavy se k sobě přibližují. U mostu otočeného dochází ke znatelnému víření mezi pilíři.

## 10 Závěr

V práci byly shrnuty nejběžnější typy mostních konstrukcí a jejich použití dle dané lokality. V záplavových oblastech na malých vodních tocích se dříve stavěly mosty s pilíři, to se v době povodní neosvědčilo. Tyto mosty jsou většinou bourány a znova vystavěny bez podpěrných pilířů zmenšujících průtočný profil.

Zajímavé zjištění vyplynulo z grafu závislosti průtoku na rychlosti. Ukázalo se, že nejvhodnějším průřezem říčního koryta je průřez tvaru lichoběžníku. V tomto průřezu nejpomaleji stoupá vodní hladina a díky příznivému tvaru nedochází k výrazným erozím břehů.

Vlivem říčních erozí je třeba v obydlených částech regulovat toky tak, aby se zabránilo k podemílání břehů a škodám na majetku.

Velká pozornost byla věnována obtékání pilířů. Vymodelování vybraných druhů pilířů proběhlo v programu SolidWorks. Modely byly využity pro simulaci obtékání ve FloXpress. Většina obrázků v této práci je rovněž ze SolidWorksu.

Práce se zabývala hydrodynamickou analogií a simulací obtékání mostních pilířů v hydrodynamické vaně. Pro zobrazení proudnic byly v hydrodynamické vaně použity dvě metody - metoda nitěných sond a metoda prachových částic. Při pokusu s nitěnými sondami se úplav z důvodů nízkého průtoku neprojevil, vyšší průtok nebylo možné v laboratorních podmínkách docílit. Výstupy druhé metody byly zaznamenány a vyhodnoceny.

Výsledky pokusů byly aplikovány na vybranou lokalitu historického mostu v Českém Krumlově. Pokud by hlavním kritériem úprav mostu bylo obtékání pilířů, jeví se jako nejvhodnější řešení rozšíření mostu a vytvoření lichoběžníkového průřezu koryta. Průtok by se zvětšil, hladina by v upraveném korytě stoupala pomaleji, stavba by zůstala na původním místě a zachovala by se její historická hodnota. Protože lokalita byla vybrána pouze z důvodu aplikace pokusů v reálném prostředí, závěrečná práce nezohledňuje cenu jednotlivých návrhů a nebere v úvahu zájmy zúčastněných stran, není zde zahrnuto rozhodnutí o dalším osudu této stavby.

Odborná literatura se o obtékání různých průřezů mostních pilířů zmiňuje jen zřídka. Výjimkou je kniha Betonové mosty od Jiřího Klimeše [5], kde se uvádí, že optimálním tvarem průřezu pilíře je rybina. Při pokusech s jednotlivými tvary průřezů pilířů bylo v hydrodynamické vaně i ve FloXpress prokázáno, že za rybinovitým průřezem vzniká nejužší a nejkratší úplav s nejmenším vznikem poruch - vírů v porovnání s ostatními průřezy mostních pilířů.

Hlavním přínosem závěrečné práce je praktické ověření obtékání zvolených typů pilířů a jejich vyhodnocení. Na závěrečnou práci by bylo vhodné navázat a rozšířit vědu o studii všech ostatních typů průřezů pilířů experimenty v hydrodynamické vaně a výsledky porovnat se simulacemi obtékání v programech FloSimulation nebo Fluent.

## 11 Použitá literatura

- [1] Řezníček, Radoš. Visualisace proudění. Praha : Academia, 1972. 175 s.
- [2] Marešová, Ivana. Hydraulika I : příklady. Praha: ČVUT, 1998. 243 s. ISBN 80-01-01162-3
- [3] Petříková, Markéta. Experimentální metodika a zařízení pro identifikaci a optimalizace disipativních procesů vizualizačními metodami. Liberec: TUL, 2008.
- [4] Nožička, Jiří. Analogové metody v proudění. Praha : Academia, 1967. 200 s.
- [5] Klimeš, Jiří. Betonové mosty I. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1958. 240 s.
- [6] <http://libri.cz/databaze/mosty/>
- [7] <http://www.veronica.cz/voda/dejte.html>
- [8] <http://www.estav.cz/>
- [9] <http://www.idnes.cz/>
- [10] <http://www.arch-bridges.com>
- [11] <http://www.shp.eu/strasky-husty-a-partneri/projekty/>
- [12] <http://www.mapy.cz/>
- [13] <http://www.pvl.cz/>
- [14] <http://www.converter.cz/>
- [15] <http://www.solidworks.com/>

## **12 Přílohy**

- 1 Zvětšené snímky z hydrodynamické vany
- 2 Popis snímků z hydrodynamické vany
- 3 Zpráva z FloXpress